



文章栏目: Anammox⁺生物脱氮工艺与应用

DOI 10.12030/j.cjee.202302112 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

葛聪, 薛晓飞, 穆永杰, 等. 微氧曝气-一段式厌氧氨氧化-反硝化组合工艺处理餐厨沼液[J]. 环境工程学报, 2023, 17(4): 1111-1117. [GE Cong, XUE Xiaofei, MU Yongjie, et al. The treatment of food waste digestate by combined process of micro-oxygen aeration, one-stage anaerobic ammonification and denitrification[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(4): 1111-1117.]

微氧曝气-一段式厌氧氨氧化-反硝化组合工艺处理餐厨沼液

葛聪¹, 薛晓飞², 穆永杰², 张丽丽^{2,✉}, 孙治荣¹

1. 北京工业大学环境与生命学部, 北京 100124; 2. 北控水务集团有限公司北控水务研究院, 北京 100102

摘要 针对餐厨沼液高氨氮、低 C/N 的特点, 采用“微氧曝气-一段式厌氧氨氧化-BioClens 反硝化”工艺, 进行了餐厨沼液脱氮除碳的小试研究。经 150 d 的运行优化, 系统稳定后该工艺的耗氧有机物(以 COD 计)、TN 平均去除率分别达到 81.3% 和 81.8%。微氧曝气单元为厌氧氨氧化单元消除餐厨沼液中有有机物的影响并保留 NH₄⁺-N, 其耗氧有机物(以 COD 计)及 NH₄⁺-N 去除率分别为 81.6% 和 13.7%, 为厌氧氨氧化稳定运行提供保障。厌氧氨氧化单元是 NH₄⁺-N 的主要去除单元, 稳定后运行后总氮去除负荷为 0.480 kg·(m³·d)⁻¹; BioClens 反硝化单元对前两段工艺中产生的 NO₃⁻-N 进行反硝化深度去除, 在以乙酸钠为碳源, 包埋固定化填料填充比为 5%、C/N=3 的情况下, 其平均 NO₃⁻-N 去除率达 90%。该工艺实现了对餐厨沼液经济高效处理, 具有应用潜力。

关键词 餐厨沼液; 微氧曝气; 厌氧氨氧化; 包埋固定化; 反硝化

目前, 餐厨垃圾处理技术主要包括填埋、焚烧和厌氧发酵 3 种方式, 其中厌氧发酵处理因具有较高的资源回收利用优势, 在餐厨垃圾处理项目中得到广泛应用。然而, 我国餐厨垃圾平均含水率高达 80%~95%, 在厌氧发酵过程中会产生大量餐厨沼液。以 500 t·d⁻¹ 的餐厨垃圾厌氧发酵项目为例, 处理过程中会产生约 600~650 t·d⁻¹ 的厌氧沼液^[1]。餐厨垃圾发酵沼液具有污染物成分复杂, 有机物和氨氮浓度、盐分、悬浮物和油脂含量高等特点, 是一种难处理废水^[2], 其常规处理工艺普遍具有工艺复杂、投资和运行成本高等问题。

厌氧氨氧化技术是厌氧氨氧化菌(anaerobic ammonia-oxidizing bacteria, AnAOB)在缺氧/无氧条件下, 以氨氮为电子供体、亚硝酸盐为电子受体, 产生氮气和少量硝酸盐的生物反应。该技术作为一种短流程新型脱氮途径, 可降低曝气能耗 60% 以上, 节省有机碳源 100%, 减排温室气体 90% 以上, 降低污泥产量 90%, 减少占地面积 80%^[3]。目前, 厌氧氨氧化技术主要用于污泥消化液、养殖废水、光伏废水等高氨氮工业水处理, 在世界范围内已有较多的应用案例, 其显著的技术经济优势已得到证明。但由于餐厨发酵沼液废水的复杂性, 其在该领域鲜见成功应用报道。

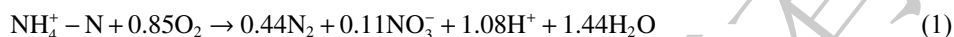
餐厨沼液中高浓度耗氧有机物(以 COD 计)对厌氧氨氧化反应的影响, 以及厌氧氨氧化出水中含较高浓度硝酸盐氮等问题都是该技术在工程应用中存在的技术难题。厌氧氨氧化菌属于自养

收稿日期: 2023-02-21; 录用日期: 2023-03-19

基金项目: 北控水务集团自主科技立项课题(ZZLX-2018-05)

第一作者: 葛聪(1998—), 男, 硕士研究生, 854516047@qq.com; ✉通信作者: 张丽丽(1977—), 女, 博士, 正高级工程师, zhanglili03@bewg.net.cn

菌, 生长周期长, 易受到进水中耗氧有机物(以 COD 计)的冲击, 导致异养菌过度增殖使厌氧氨氧化菌活性受到影响^[4]。由一段式厌氧氨氧化的反应式(1)可知^[5], 该工艺的理论 TN 去除率为 88%, 有 11% 的 TN 以 NO_3^- -N 形式存在, 且在实际运行中部分亚硝酸盐会被氧化为 NO_3^- -N, 导致出水 TN 去除率降低^[6-7]。



微氧曝气通过精准曝气的方式, 创造低溶解氧(dissolved oxygen, DO)^[8]的反应条件, 不利于好氧氨氧化菌(aerobic ammonia-oxidizing bacteria, AOB)的生长, 能在去除沼液中 COD 的同时保留大部分 NH_4^+ -N, 为后续厌氧氨氧化单元进水条件提供保障。BioClens 填料作为一种反硝化菌包埋固定化技术, 具有微生物浓度高、不易流失、处理效率高、不需要额外固液分离等优点^[9], 为深度去除硝酸盐氮提供了高效技术途径。

本研究采用微氧曝气—一段式厌氧氨氧化耦合 BioClens 反硝化处理餐厨沼液, 研究工艺总体处理性能, 探讨各核心反应单元对目标污染物的去除过程和机制, 拟为餐厨沼液废水处理提供一种短流程、高效经济的技术路径, 进而为该技术在厨沼液废水处理领域的工程应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 实验装置

微氧曝气池为有机玻璃材质, 分为反应区、二沉池、中间水池三部分(图 1)。曝气池的长宽高为 20 cm×20 cm×50 cm, 有效容积 20 L。微氧曝气池出水经蠕动泵打入厌氧氨氧化单元, 厌氧氨氧化单元为膨胀颗粒污泥床(expanded granular sludge bed, EGSB)反应器, 主体为有机玻璃材质, 内径 15 cm, 高径比 8:1, 有效容积 20 L。外设水浴套筒维持反应器温度为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。底部设置曝气盘, 曝气量由气体流量计控制并通过时间继电器实现间歇曝气。溢流水经蠕动泵打入 BioClens 反硝化单元, 其主体为有机玻璃材质, 内径 12 cm, 有效容积 4 L。配置搅拌装置, 出水口设置格网防止 BioClens 填料流失。

1.2 接种污泥和实验用水

微氧曝气池接种污泥取自某污水处理厂二沉池回流污泥。接种后微氧曝气池污泥混合液悬浮固体质量浓度(MLSS)为 $3\ 150\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 混合液挥发性悬浮固体质量浓度(MLVSS)为 $1\ 830\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。EGSB 接种污泥取自某污水处理厂 2 个厌氧氨氧化反应器, 包括厌氧氨氧化颗粒污泥及一段式厌氧氨氧化反应器絮体污泥共 10 L, 体积比为 1:2, 接种后 EGSB 反应器 MLSS 为 $11\ 280\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MLVSS 为 $7\ 265\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

实验用水为北京市某餐厨垃圾场内餐厨沼液的气浮出水, 在经陶瓷膜预处理去除大部分悬浮物(suspended solids, SS)后冷藏保存。再根据不同的运行阶段需求, 用自来水稀释后作为反应器进水。餐厨沼液原水及经陶瓷膜过滤后的具体水质见表 1。

1.3 实验方法

全流程工艺系统先启动微氧曝气单元与厌氧氨氧化单元, 出水稳定后启动 BioClens 反硝化单

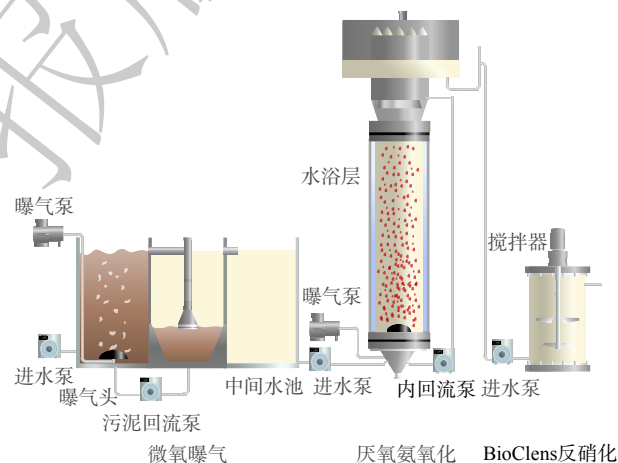


图 1 反应器装置图

Fig. 1 Diagram of reactor installation

表1 餐厨沼液水质指标

Table 1 Water quality of food waste digestate

水样种类	COD/(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	pH	颜色
沼液原水	6 500~13 000	1 600~3 200	2 000~3 800	8 000~10 000	7.9~8.1	黑色
陶瓷膜处理后出水	3 000~6 000	1 500~3 000	1 700~3 300	60~150	8.0~8.3	黄色

元。在微氧曝气单元中进行餐厨沼液耗氧有机物(以COD计)的去除同时保留大部分NH₄⁺-N,为后续厌氧氨氧化单元提供低COD、高NH₄⁺-N的进水条件。随后通过减小沼液的稀释倍数来提升工艺系统不同阶段的氮负荷,根据进水COD变化调整曝气量保证耗氧有机物(以COD计)的去除。微氧曝气单元各阶段控制水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)为10 h,污泥龄(sludge retention time, SRT)为4~5 d,污泥回流比为150%,DO为0.5~1.0 mg·L⁻¹,pH为7.4~7.8,温度23~28℃,其他运行参数见表2。在EGSB反应器中进行一段式厌氧氨氧化的启动及负荷提升,通过间歇精准曝气抑制亚硝酸盐氧化细菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB)的活性,提升AOB和AnAOB的活性。反应器各阶段在HRT为10 h、DO为0.1~0.3 mg·L⁻¹、pH为7.9~8.2、温度为(30±2)℃的条件下,实现餐厨沼液的稳定高效脱氮,其他运行参数见表2。BioClens反硝化单元在HRT为2 h、pH为7.9~8.1条件下优化C/N,去除NO₃⁻-N,实现工艺TN去除效率的提升。

表2 微氧曝气及厌氧氨氧化运行参数

Table 2 Operational parameters of the micro oxygen aeration and anaerobic ammonia oxidation

阶段	时间/d	微氧曝气			厌氧氨氧化			曝停比
		进水NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	进水TN/(mg·L ⁻¹)	进水COD/(mg·L ⁻¹)	进水NH ₄ ⁺ -N/(mg·L ⁻¹)	进水TN/(mg·L ⁻¹)	曝气量/(L·min ⁻¹)	
I	1~63	150	160	198~396	120	144	0.3	20 s:40 s
II	64~96	200	213	192~336	170	196	0.3	30 s:30 s
III	97~116	270	286	282~344	240	265	0.35	30 s:30 s
IV	117~150	340	363	384~492	300	332	0.35	40 s:20 s

注:厌氧氨氧化第I阶段内回流比为500%~800%其余阶段均为800%。

1.4 分析方法

各项水质指标的检测均按照国标法测定^[10]。NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法;NO₂⁻-N采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;NO₃⁻-N采用紫外分光光度法;TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;污泥浓度采用称重法;COD采用美国哈希DR-200型号快速消解仪;BOD₅采用稀释接种法;温度、pH、DO采用德国WTW 3430测定仪测定。

2 结果与讨论

2.1 全流程工艺脱氮除碳性能分析

全流程工艺系统对餐厨沼液中COD和TN的变化如图2所示。第1~76天,系统为微氧曝气与厌氧氨氧化单元串联运行,第77天BioClens反硝化单元启动。该工艺稳定后(阶段IV)对餐厨沼液中耗氧有机物(以COD计)的平均去除率达到81.3%。系统中微氧曝气是耗氧有机物(以COD计)的主要去除单元,其出水中耗氧有机物(以COD计)的组成大部分为腐殖酸等难生物降解物质^[11]。因此,系统出水COD与微氧曝气出水COD相近,且不会对厌氧氨氧化单元造成影响。

由图3可知,在4个阶段中,全流程工艺系统TN去除效果随着厌氧氨氧化单元脱氮能力的提升逐步增加。在第1~76天全流程工艺系统TN去除率较低,平均为52.4%,此时主要影响因素为厌

氧氨氧化出水中的 NO_3^- -N。在第 77 天，BioClens 反硝化单元启动，对 NO_3^- -N 进行深度处理，全流程工艺系统的平均 TN 去除率最终提升至 81.8%，表现出良好的脱氮性能。

2.2 微氧曝气单元 COD 去除及氮素转化分析

在连续流反应器中，通过控制低 DO 的运行条件，利用活性污泥微生物对有机物的降解速率远高于 NH_4^+ -N 氧化速率的特点，在实现餐厨沼液去除耗氧有机物（以 COD 计）的同时保留 NH_4^+ -N，为后续厌氧氨氧化单元创造良好的进水条件。具体耗氧有机物（以 COD 计）及 NH_4^+ -N 去除效果见图 4 和图 5。该工艺以进水氮负荷为控制指标，在阶段 I~IV 逐步提高系统氮负荷，同时根据餐厨沼液 C/N 变化调整曝气量，使 DO 维持在较低水平，保证耗氧有机物（以 COD 计）去除的同时，减少 NH_4^+ -N 的损失量。

第 I~IV 阶段 C/N 为 1.2~1.5，根据 COD 变化调整曝气量使 DO 维持在 $0.3\sim 0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，结果表明，在溶解氧受限的条件下，反应器中异养菌对 DO 的竞争力远高于 AOB 及 NOB。由于 AOB 本身基数较小，活性又受到抑制^[12]，使得异养菌对 DO 的竞争力进一步加大，得以在去除餐厨沼液耗氧有机物（以 COD 计）的同时减少 NH_4^+ -N 的氧化。反应器最终平均 NH_4^+ -N 去除率为 13.7%，平均耗氧有机物（以 COD 计）去除率达到 81.6%，出水 BOD_5/COD 值为 $0.05\sim 0.08$ 。这说明剩余 COD 大多为腐殖酸等大分子难降解物质，微氧曝气单元能为后续厌氧氨氧化单元消除有机物影响的同时提供 NH_4^+ -N 基质。

由图 5 可知，微氧曝气单元进水 NH_4^+ -N 损失量高于 NO_3^- -N 及 NO_2^- -N 增长量，结合此单元长期低 DO 的运行工况和现有研究表明，由于反应器处于微氧曝气，小部分 NH_4^+ -N 转化为 NO_3^- -N 后发生同时硝化反硝化（simultaneous nitrification and denitrification, SND）反应产生 N_2 ^[8]，实现小部分部分 TN 去除，平均去除率约为 7.9%。

2.3 一段式厌氧氨氧化单元氨氮去除过程分析

在 EGSB 中接种一段式厌氧氨氧化颗粒污泥作为 AOB、anammox 菌的种泥，并通过 EGSB 高回流比及上升流速特点，通过系统纵

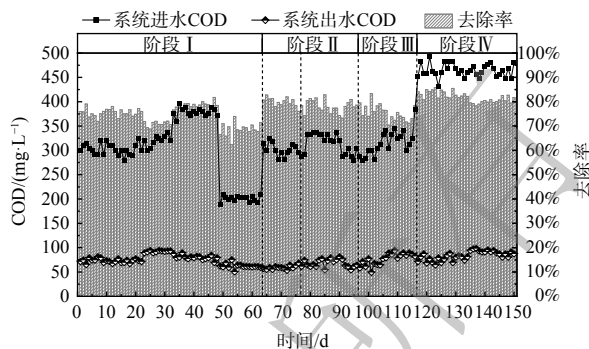


图 2 系统 COD 去除性能

Fig. 2 COD removal performance of the system

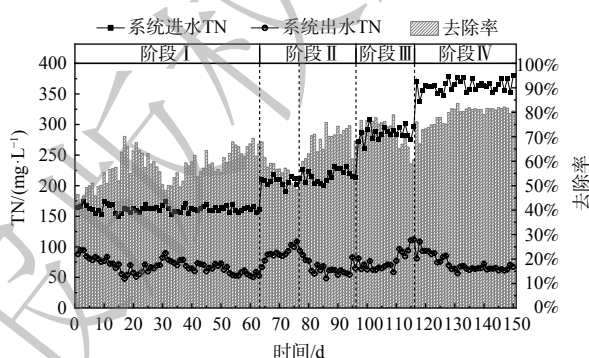


图 3 系统 TN 去除性能

Fig. 3 TN removal performance of the system

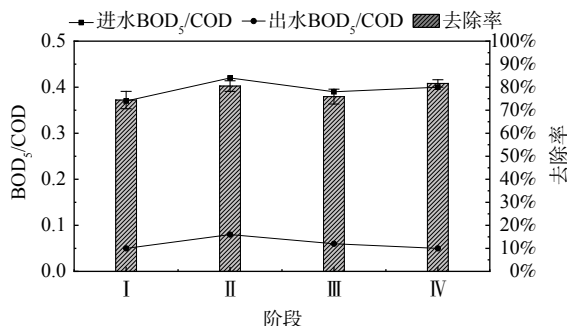


图 4 微氧曝气耗氧有机物（以 COD 计）去除性能

Fig. 4 Oxygen-consuming organic matter (COD) removal performance of micro oxygen aeration

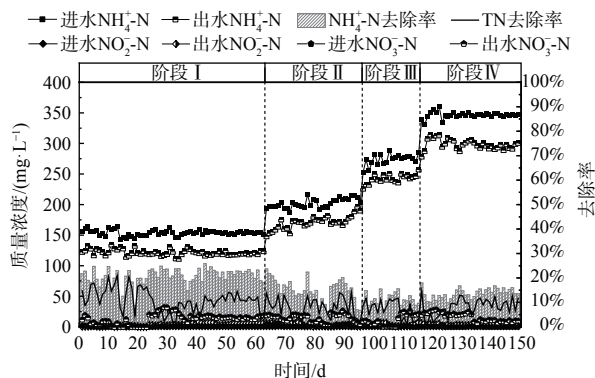


图 5 微氧曝气进出水三氮变化情况

Fig. 5 Variation of nitrogen in the inlet and outlet water of micro oxygen aeration

向水力冲刷, 逐步降低系统中 NOB 的丰度, 同时通过间歇精准曝气调控手段, 实现一段式厌氧氨氧化的快速启动。各阶段脱氮效果见图 6 和图 7。

第 I 阶段 (1~63 d) EGSB 的进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度控制在 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 曝气量为 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 曝停比为 1:2 (20 s:40 s)。在 1~11 d 内, 为 AOB 和 anammox 菌的适应协调期, 故系统平均总氮去除负荷 (nitrogen removal rate, NRR) 较低为 $0.132 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。在 12~33 d 内, 系统平均 NRR 上升至 $0.178 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.12, $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.88。这说明反应器内 AOB、anammox 菌及 NOB 等各类功能菌的竞争协作关系初步确立, 且 NOB 没有占据优势生态位^[13], 一段式厌氧氨氧化反应成功启动。在 34~53 d 内, 系统出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度上升, 原因是反应器内一部分絮状污泥在长时间水力冲刷及曝气的影响下, 堆积在三相分离器附近, 而另一部分絮状污泥及大部分 anammox 颗粒污泥堆积在反应器底部, 在反应区没有形成较好的纵向分布, 导致反应区污泥量过少, DO 含量上升, 促使 NOB 的活性上升的同时抑制了 anammox 菌的活性^[14]。因此, 在 54~63 d 内将反应器的内回流比由 500% 提升至 800%, 以增加底部污泥的流化效果, 至第 63 天 NOB 的活性得到了较好地抑制, 系统 NRR 为 $0.235 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 0.12, $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 0.93, 与理论值 $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}=0.11$, $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}=0.88$ 相近。

第 II 阶段 (64~96 d) EGSB 的进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度提升至 $170 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 曝气量仍维持在 $0.3 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 曝停比提高至 1:1 (30 s:30 s) 来增加系统的曝气总量, 以此提高 AOB 的活性, 增加系统的 NRR。此阶段系统平均 NRR 为 $0.241 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.14, $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.88, 系统内 NOB 活性抑制良好; 同时 EGSB 出水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度极低, 故此时系统 NRR 限制因素仍为 AOB 的活性。

第 III 阶段 (97~116 d) EGSB 的进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度提升至约 $240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 曝气量提升至 $0.35 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 曝停比仍为 1:1 (30 s:30 s) 来进一步增加系统的曝气总量, 以此提升 AOB 的活性。系统的平均 NRR 提升至 $0.372 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.12, $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.89, 在间歇精准曝气的调控下, 使得 EGSB 中 DO 维持在 $0.20\sim 0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NOB 始终没有占据优势生态位, AOB 的活性进一步增强且与 anammox 菌的协同脱氮作用进一步完善, 系统脱氮能力显著提升。

第 IV 阶段 (117~150 d) 将 EGSB 的进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度提升至约 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 曝气量仍为 $0.35 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 曝停比提升为 2:1 (40 s:20 s) 来进一步增加系统的曝气总量刺激 AOB 的活性。由于系统内微生物经过长期驯化且不断通过高水力冲刷对絮体中的 NOB 进行去除, 故提升曝气并没有使 NOB 活性上升^[15]。系统平均 NRR 进一步提升至 $0.480 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, $\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.13, $\Delta\text{TN}/\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均为 0.89, 即系统呈现良好的脱氮性能。

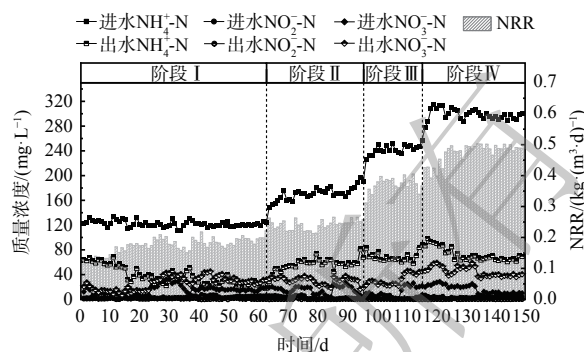


图 6 EGSB 脱氮性能

Fig. 6 Nitrogen removal performance of EGSB

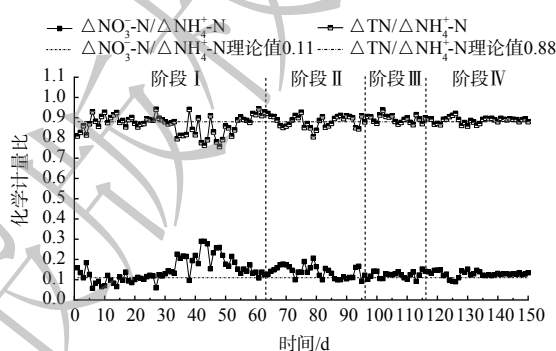


图 7 化学计量比变化情况

Fig. 7 Variation of stoichiometric ratios

2.4 BioClens 反硝化硝酸盐氮去除效果分析

BioClens 不同 C/N 反硝化脱氮效果分析。将 EGSB (77~150 d) 出水作为 BioClens 反硝化单元的进水, 以乙酸钠为外加碳源, 在 HRT=2 h, C/N=4、3、2 的条件下进行深度脱氮研究。对微氧曝气及厌氧氨氧化单元产生的 NO_3^- -N 进行去除。具体脱氮效果见图 8。

在 1~15 d 内反应器 C/N 控制为 4。在启动初期 1~3 d 内, 包埋微生物在投加前一直处于冷藏保存的转态, 活性尚未恢复 BioClens 单元反硝化能力较弱, 出水 NO_3^- -N 质量浓度较高。在 4~15 d, BioClens 荚膜片中反硝化菌活性恢复, 出水 NO_3^- -N 小于 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且有近 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右 NH_4^+ -N 被去除。这是由于 BioClens 进水为厌氧氨氧化单元的出水, 其中夹杂着厌氧氨氧化污泥, 同时厌氧氨氧化出水 DO 小于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 约为 8。研究表明, 乙酸钠为外加碳源在偏碱性条件下反硝化反应易造成 NO_2^- -N 积累^[6], 故 BioClens 系统可能存在短程反硝化-厌氧氨氧化反应。由图 9 可知, 此阶段 BioClens 的出水 COD 较厌氧氨氧化单元高 $10\sim 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这说明碳源投加过量, 故在 16~33 d 内降低反应器 C/N 至 3, 期间出水 NO_3^- -N 小于 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 且没有造成 NO_2^- -N 的过量积累, BioClens 出水 COD 与厌氧氨氧化单元相近, 即此时 C/N 较为适宜。在 34~40 d 内将反应器 C/N 控制为 2, 出水 NO_3^- -N 质量浓度上升至约 $12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且有约 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NO_2^- -N 积累。此时反硝化反应不完全, 短程反硝化反应在系统占主导地位, 则表明该 C/N 过低。综上所述, 将 C/N=3 作为 BioClens 反硝化单元的最佳 C/N, 并于第 41~74 天调整 C/N 为 3, 最终 NO_3^- -N 去除率约稳定为 90%, 实现了对 NO_3^- -N 的高效去除。

3 结论

1) 微氧曝气-一段式厌氧氨氧化-反硝化组合工艺实现了以厌氧氨氧化为核心对餐厨沼液的经济高效脱氮除碳, 解决了耗氧有机物 (以 COD 计) 对厌氧氨氧化反应的影响及厌氧氨氧化出水含较高浓度硝酸盐氮的问题。该工艺总体耗氧有机物 (以 COD 计) 及 TN 的去除效率达 81.3%、81.8%。

2) 微氧曝气单元通过精准曝气使 AOB 活性得到有效抑制, 在去除沼液中耗氧有机物 (以 COD 计) 的同时保留了大部分 NH_4^+ -N, 最终对餐厨沼液中耗氧有机物 (以 COD 计) 平均去除率达 81.6%, 平均 NH_4^+ -N 去除率为 13.7%, 为后续厌氧氨氧化单元稳定运行提供保障。

3) BioClens 反硝化单元在 C/N=3, 填充比为 5% 的条件下脱氮效果最佳, 实现对微氧曝气单元及厌氧氨氧化单元产生 NO_3^- -N 的有效去除, 平均 NO_3^- -N 去除率为 90%。微氧曝气-一段式厌氧氨氧化耦合 BioClens 反硝化工艺系统为餐厨沼液的高效低耗处理提供了参考, 具有应用潜力。

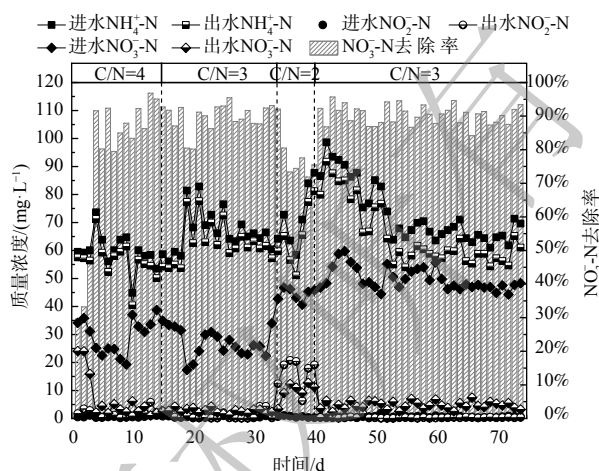


图 8 BioClens 反硝化进出水三氮变化情况

Fig. 8 Variation of nitrogen in the inlet and outlet water of BioClens denitrification

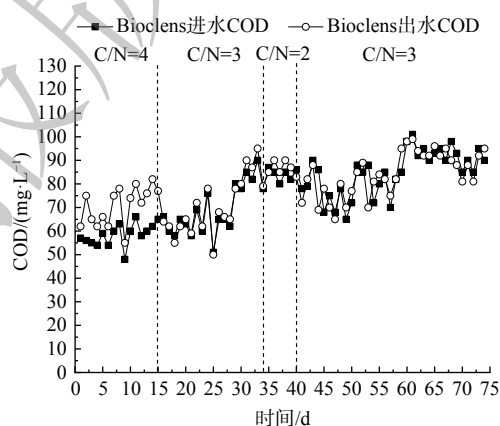


图 9 BioClens 反硝化进出水 COD 变化情况

Fig. 9 Variation of COD in the inlet and outlet water of BioClens denitrification

参 考 文 献

- [1] 关永年, 刘洪波, 孟庆臣, 等. 气浮+两级A/O+气浮工艺处理某餐厨沼液[J]. *工业水处理*, 2022, 42(4): 152-157.
- [2] 张周, 赵明星, 阮文权, 等. 短程硝化反硝化工艺处理低C/N餐厨废水[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(9): 4165-4170.
- [3] 杨庆, 程蓉, 刘秀红, 等. 一体式厌氧氨氧化工艺系统的研究与应用进展[J]. *环境工程学报*, 2022, 16(3): 775-787.
- [4] WANG L, HONG Y, GU J D, et al. Influence of critical factors on nitrogen removal contribution by anammox and denitrification in an anammox-inoculated wastewater treatment system [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 40.
- [5] SZATKOWSKA B, CEMA G, PLAZA E, et al. A one-stage system with partial nitrification and anammox processes in the moving-bed biofilm reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2007, 55(8/9): 19-26.
- [6] ARRIAGADA C, GUZMÁN-FIERRO V, GIUSTINIANOVICH E, et al. NOB suppression and adaptation strategies in the partial nitrification-Anammox process for a poultry manure anaerobic digester[J]. *Process Biochemistry*, 2017, 58: 258-265.
- [7] WANG Z, ZHENG M, HU Z, et al. Unravelling adaptation of nitrite-oxidizing bacteria in mainstream PN/A process: Mechanisms and counter-strategies[J]. *Water Research*, 2021, 200: 117239.
- [8] 段守鹏, 刘丰源, 郑少奎, 等. 城市污水高负荷微好氧活性污泥工艺长(责任编辑: 靳炜)
- 期运行特征与脱氮机理[J]. *给水排水*, 2021, 57(S1): 115-120.
- [9] 宋佳强, 李军, 陈光辉, 等. 利用包埋固定化技术进行反硝化脱氮的研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(23): 105-110.
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M], 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] F. LU, T. Cai, L. M. Shao, P. J, et al. He resource potential of liquid digestate from food and kitchen waste digestion associated with particle size fractionation [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2015: 661-668.
- [12] 官晨, 沈翼军, 杨殿海. 高负荷活性污泥法对生活污水的处理效果[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(35): 96-99.
- [13] 窦元. DO浓度对全程自养脱氮颗粒污泥脱氮效能的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [14] 高大文, 窦元, 王小龙. 微氧条件下培养AOB-Anammox颗粒污泥[J]. *北京工业大学学报*, 2015, 41(10): 1462-1468.
- [15] 王小龙. 基于颗粒污泥的单级自养脱氮系统构建及其脱氮效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [16] QIAN W, MA B, LI X, et al. Long-term effect of pH on denitrification: High pH benefits achieving partial-denitrification[J]. *Bioresour Technol*, 2019, 278: 444-449.

The treatment of food waste digestate by combined process of micro-oxygen aeration, one-stage anaerobic ammonia oxidation and denitrification

GE Cong¹, XUE Xiaofei², MU Yongjie², ZHANG Lili^{2*}, SUN Zhirong¹

1. Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. The Institute of Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing Enterprises Water Group Limited, Beijing 100102, China

*Corresponding author, E-mail: zhanglili03@bewg.net.cn

Abstract According to the characteristics of high ammonia nitrogen and low C/N, a pilot study on nitrogen and carbon removal of food waste digestate was carried out by using the process of "micro oxygen aeration - one-stage anaerobic ammonia oxidation-BioClens denitrification". The results showed that the average removal rates of COD and TN reached 81.3% and 81.8% after 150 d of operation optimization. The micro oxygen aeration unit eliminated the effect of organic matter and retained $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from the food waste digestate for the anaerobic ammonia oxidation unit, which removed 81.6% of COD and 13.7% of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and provided assurance for stable operation of anaerobic ammonia oxidation. The anaerobic ammonia oxidation unit was the main $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal unit and the average total nitrogen removal rate after stabilization was $0.480 \text{ kgN}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. The BioClens denitrification unit removed the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ generated in the first two stages of the process, and its average $\text{NO}_3^-\text{-N}$ removal rate reached 90% with sodium acetate as the carbon source and an encapsulated immobilized filler filling ratio of 5% and C/N=3. The process achieved an economical and efficient treatment of food waste digestate and will have broad application prospects.

Keywords food waste digestate; micro oxygen aeration; anaerobic ammonia oxidation; encapsulation immobilization; denitrification